

討10 取鍋精錬による清浄鋼の高能率生産技術

川崎製鉄(株) 技術研究所 小口征男 藤井徹也
 千葉製鉄所 駒村宏一 数土文夫
 水島製鉄所 難波明彦 大西正之

1. 緒言

鋼の高級化にともない、不純物濃度を著しく低くした清浄鋼の要求が増す傾向にある。高い生産性を保ちながらこの要求に応じるためには、取鍋精錬能力の一層の向上が必要であり、さらに、溶銑予備処理から鑄造に至る製鋼全工程を通じて、不純物除去処理を最適化することが必要である。以下、このような観点から、当社において開発してきた清浄鋼の高能率生産技術について報告する。

2. プロセスの構成

2.1. プロセスの最適化

当社における清浄鋼溶製法を Table 1 に示す。各成分は以下に述べるように精錬各工程を連繫して最適化することによって能率よく極低濃度に行うことができる。

(1) 脱炭 転炉段階で [C] 濃度を十分に下げておくことによって、真空脱炭処理での到達値は著しく低くでき、能率が向上する。また、出鋼温度の低下も可能となる。当社では、鋼浴の酸化損失を抑制しつつ 100 ppm といった低炭素濃度域までの脱炭が可能な底吹き転炉(Q-BOP),あるいは、上底吹き転炉(K-BOP)の特長を活用し、高能力のRH環流式真空脱ガス装置(RH)との連繫によって、高品質極低炭素溶鋼([C]≤20 ppm)の高能率生産技術を確立した。

(2) 脱磷 Q-BOP, K-BOP の優れた溶鋼攪拌力と純酸素ガスによるフラックスインジェクション技術を活用すると、Fig.1 に示すように極めて効率よく溶銑脱磷ができる。この技術の確立によって本吹錬で [P] ≤ 60 ppm の溶鋼が容易に得られる。また、通常法では転炉の熱負荷が大きくなる特殊な高合金鋼の溶製に際しては、未脱酸で出鋼してCaO系フラックスを添加する出鋼脱磷法を用い、ASEA-SKF と組合せることによって [P] ≤ 30 ppmとする製造法を確立した。

(3) 脱硫 極低硫鋼の溶製は、溶銑脱硫と溶鋼脱硫の組合せで行う。後述のように、スラゲー溶鋼

Table 1 System for production of clean steels (Pret.:Hot Metal Pretreatment)

	Process	Content	Products
1 Low [C]	Q-BOP K-BOP → RH(high flow rate)	[C] ≤ 20ppm	Sheet for deep-drawing Si-steel
2 Low [P]	Pret. Q-BOP K-BOP LD-KG-LI → Converter	[P] ≤ 60ppm	Line+pipe 9%Ni-steel High quality plate
3 Low [S]	Pret. Injection CaO, CaCO ₃ → Converter	Flux Injection → [S] ≤ 10ppm	Special alloy steel
		ASEA-SKF → [P] ≤ 30ppm [S] ≤ 5ppm [H] ≤ 0.7ppm	
4 Low [N]	Pret. → Converter → RH	[N] ≤ 15ppm	Plate for welding
5 Quick Deoxidation	Converter → PM	Cleanness [Oxide] ≤ 0.05%	Ordinary sheet steel ERW pipe

間の S の分配比 $K_s (= (S)_{slag} / [S]_{metal})$ の実用値には上限があるので、溶鋼脱硫処理前の $[S]$ を極力低値とし、フラックスの使用量と処理時間を最小限にとどめて溶鋼温度降下を抑えることが、耐火物損傷や転炉内脱磷に対する温度の影響も含め、総合的に有利である。当社では、溶銑段階での脱硫の優位性に着目して、微粉 $CaCO_3$ のインジェクションによって $[S] \leq 10 \text{ ppm}$ とする溶銑脱硫法²⁾を開発した。

(4) 脱窒 大気の内侵入防止効果に優れる Q-BOP の特長を活用すると、10 ppm 以下の吹止め窒素が得られる。RH と組合せることによって、極低窒素鋼の溶製が可能である。また、高合金鋼の溶製に対しては、LD-KG と ASEA-SKF、あるいは K-BOP と VOD の組合せがあり、極低窒素濃度の高純度フェライトステンレス鋼の溶製を可能とした。

2.2 取鍋精錬機能の強化

(1) RH における脱炭反応速度の促進

真空脱炭機構の解析から、脱炭は次式で近似されることがわかった³⁾。 $[C] = [C]_0 \exp(-K_c t)$ (1)

$K_c = [Q'/V] \{ak / (Q' + ak)\}$ (2) ($[C]_0$: 処理開始時の $[C]$, K_c : 見かけの速度定数 (s^{-1}), ak : 真空槽内の物質移動容量係数 (m^2/s), Q' : 溶鋼循環流量 (m^3/s), V : 溶鋼量 (m^3)) (2) 式の内容を図示した Fig. 2 では、能率の良い脱炭のために Q と ak の両方を大とする必要があることがわかる。さらに、極低炭素濃度領域では、後述のように取鍋内の溶鋼混合が特に重要となる。

(2) RH の溶鋼循環流量

Q の増大と取鍋内溶鋼混合の改善を目的として、 Q を測定し、 $Q = 0.04 D^2$ (3) (D : 環流管内径, 30 ~ 60 cm)

(3) 式の関係を得た。これによって、 D を十分大きくし (60 cm), 大幅に Q が増加 (140 t/min) した。

(3) 取鍋内溶鋼の混合

合金添加の場合と異なり、不純物除去の精錬過程で濃度変化速度が大きいと、取鍋内の濃度が不均一となることがある。Fig. 3 に、230t RH による溶鋼脱炭実験時に認められた取鍋内溶鋼中の深さ方向の $[C]$ の濃度分布を示す。取鍋容量が大きく、かつ、 Q が小さい時には、実線のように上部の $[C]$ 濃度が高い。しかし、この現象も、 Q の増加やガス攪拌の併用などで Fig. 3 の破線のように改善できた。

混合が遅れる部分を一種のよどみ部とみなしたモデルによって平均濃度の変化を計算し、Fig. 4 の結果を得た。よどみ部の入れ替えが遅いと鎖線のように、処理の後半に脱炭速度が低下する。

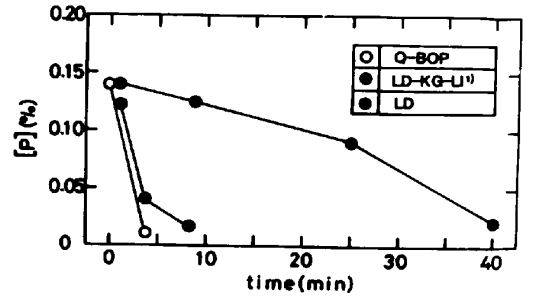


Fig. 1 Dephosphorization curves of hot metal

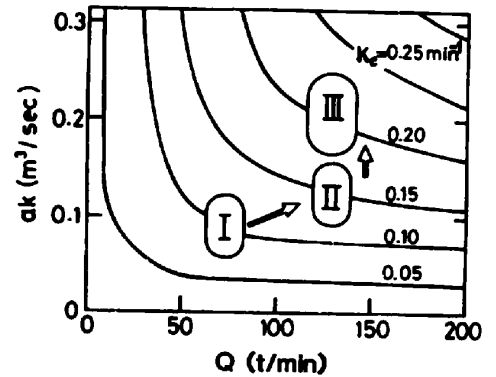


Fig. 2 Effect of Q and ak on rate constant K_c

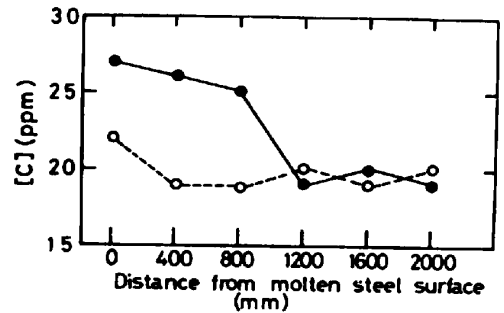


Fig. 3 Distribution of $[C]$ in ladle during RH degassing (○: $Q \approx 80$, ●: $Q \leq 40$)

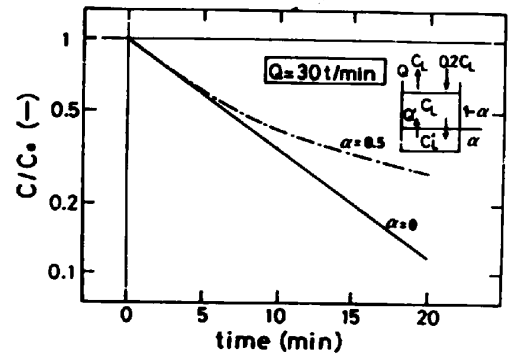


Fig. 4 Decarburization curve during RH-treatment calculated by mixing model ($Q' = 0.1Q$)

(4) 取鍋フラックスインジェクションにおける溶鋼脱硫

フラックスインジェクション時のスラグ-溶鋼間のSの分配比 K_s をFig. 5に示す。従来の報告⁵⁾と同様に、 K_s は $(\%CaO)/(\%SiO_2) \geq 6$ で、かつ、 $(\%Fe_tO + \%MnO) < 1.0\%$ のとき200 ~ 250の高値となる。

転炉スラグの混入による処理前の $(\%Fe_tO + \%MnO)$ が、処理時の $[Al]$ と $[Si]$ の変化、および、 K_s に及ぼす影響をFig. 6に示す。処理開始時の $(\%Fe_tO + \%MnO)$ が6%以下であれば、処理中のAlによる Fe_tO, MnO の還元効果によって、 K_s は130以上となる。したがって、スラグ混入量をこの範囲に抑えれば安定して極低硫鋼が得られる。

また、Fig. 7に示すように、フラックスインジェクション中に底吹きガス攪拌を併用すると脱硫速度が増大する。

(5) 攪拌強化による取鍋内脱酸反応の促進

脱酸反応速度は見かけ上、一次反応であり、その速度定数 K_0 は(4)式で表わされる⁶⁾。

$$K_0 \left(= -d \ln [O] / dt \right) = a \epsilon^n + b \dots \dots \dots (4)$$

ここで、 a, b, n : 定数、 ϵ : 攪拌エネルギー密度

脱酸処理の能率を向上して低酸素溶鋼を得るには ϵ の増大を計る必要がある。しかし、通常ガス攪拌では、 ϵ の増加を目的としてガス流量を増加すると、大気やスラグによる再酸化が生じて脱酸速度が期待どおりに向上しない。溶鋼の再酸化を防止しつつ攪拌強化の可能な後述の噴流式攪拌方法で高能率な脱酸処理を実現した。

3. 清浄鋼の量産プロセス

3.1 RHによる極低炭素溶鋼の溶製³⁾

深絞り特性に優れた冷延鋼板を連続焼鈍工程で能率良く製造するためには、 $[C] < 30 \text{ ppm}$ とする必要がある。

前述の解析結果に基づいて、RHの設備と操作方法を改善した。すなわち、環流管径を拡大して Q を十分に大とし、さらに、水素ガスやArガスによって溶鋼攪拌力を強化した。その結果、Fig. 2に示すように、脱炭反応速度は領域Iから領域IIIまで増大された。脱炭曲線をFig. 8に示すが、Q-BOPとの連繫によって10 minの処理で20 ppmまでの脱炭が可能である。

以上の高速脱炭技術により、転炉の出鋼温度は1640℃まで低下され、連続-連続鑄造による高品質な極低炭素鋼の高能率生産技術を確立した。

3.2 粉体吹込みを用いた極低磷・極低硫鋼の溶製

9%Ni鋼や耐水素誘起割れ特性を有する鋼の製造には、前

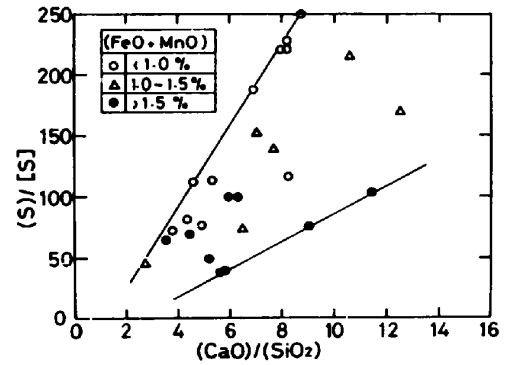


Fig. 5 Effect of basicity $(CaO)/(SiO_2)$ on sulphur partition $(S)/(S)$

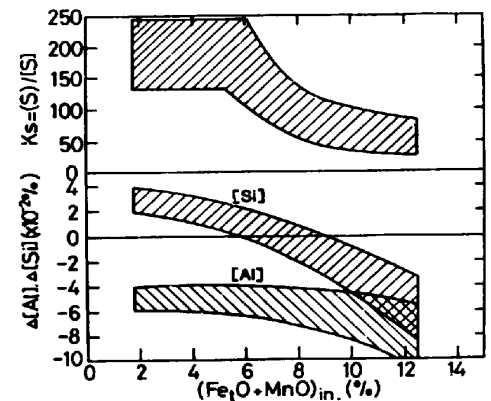


Fig. 6 Effect of $(Fe_tO + MnO)_{in}$ on $\Delta[Al]$, $\Delta[Si]$ and $(S)/(S)$ during Flux-Injection

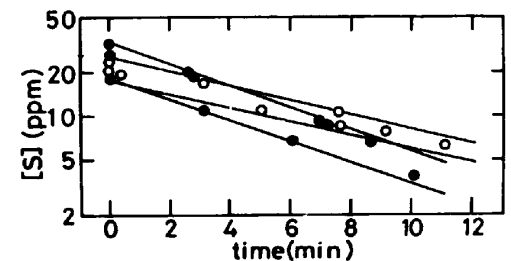


Fig. 7 Comparison of desulphurization curves during Flux-Injection between with (●) bottom blowing and without (○)

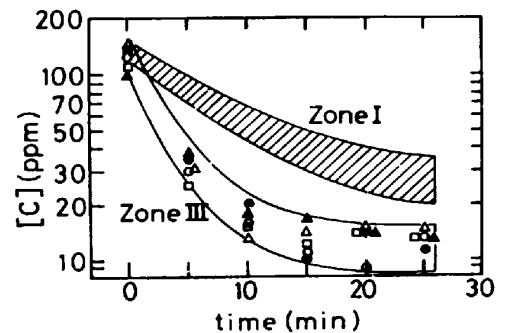


Fig. 8 Comparison of decarburization curves obtained between conditions I and III

述の溶銑・溶鋼の脱磷・脱硫精錬の組合わせを最大限に活用した方法がとられる。その結果処理終了時には、Fig. 9 に示すように [P] ≤ 50ppm, [S] ≤ 10 ppmの清浄鋼が得られる。

3.3 ASEA - SKF (LRF)法における高潔淨鋼の溶製⁷⁾

ASEA - SKF 法は、溶鋼加熱能力を持ち、とくに合金鋼の溶製に用いられる。溶銑脱磷、転炉における低温出鋼などの脱磷の最適化、出鋼脱磷、完全なスラグ分離などにより、Fig. 10 に示すように [P] ≤ 30 ppm とすることができる。転炉出鋼時に [S] ≤ 20 ppm となり、ASEA - SKF にて CaO 系フラックスを用いて Ar 底吹き攪拌と電磁攪拌を併用すれば、[S] ≤ 5 ppm となる。底吹き攪拌により溶鋼露出面積が増えて脱水素も促進され、[H] ≤ 0.7 ppm となる。

3.4 脈動噴流攪拌 P M (Pulsating Mixing) 法による量産 清浄鋼の迅速溶製^{6,8)}

真空脱ガスを要しない量産薄板材を主な対象とし、脱酸生成物の点で清浄化を目的とする P M 法を開発した。本法は Fig. 11 に示すように、通常ガス攪拌と異り溶鋼露出やスラグの巻込みによる溶鋼酸化が無いので、攪拌力を R H 脱ガス法のそれと同等以上に大きくできる。したがって、Fig. 12 に示すように本法で処理した鋼 ([Al] ≤ 0.025%) では通常ガス攪拌によるものより [O] の値が低く、ばらつきも小さい。

また、本法は Al の歩留りが高いので、従来の添加法にくらべて 0.3 kg / t 節減でき、[Al] 適中精度も高い。攪拌力が大きいので処理時間が 10 min 以下と短くてすみ、溶鋼温度降下も小さく、耐火物を主とする操業コストは通常ガス攪拌とはほぼ等しい経済的な迅速取鍋精錬法となった。

4. 結言

C, P, S, N, O などの成分を極低濃度とする清浄鋼の高生産率生産技術について、精錬各工程を連繫した総合システムとしての最適化と、取鍋精錬能力の増強の観点から述べ、当社において確立したプロセスの例を示した。

引用文献 1) 田岡ほか, 鉄と鋼, 88(1982), S205 2) 小沢ほか, 学振製鋼第19委資料(1982) 3) 住田ほか, 鉄と鋼, 68(1982), S186 4) 住田ほか, 鉄と鋼, 66(1980), S130 5) T. Usui ほか, Scanject II.(1980)12 6) 藤井ほか, 鉄と鋼, 68(1982), P. 1595 7) J. Nagai ほか, 1st Intern. Conf. on Current Solution to Hydrogen Problems in Steel 8) 藤村ほか, 鉄と鋼, 68(1982), S 867

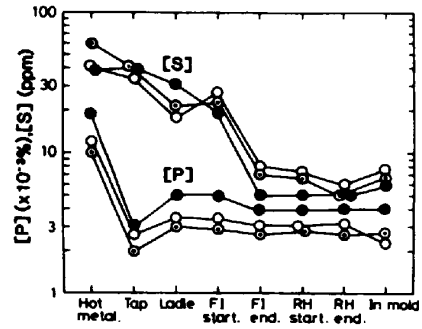


Fig. 9 Example of chemistry change during refining of line pipe steel

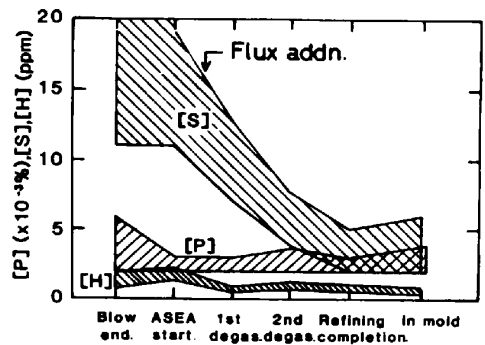


Fig. 10 Chemistry changes during refining in ASEA-SKF Process

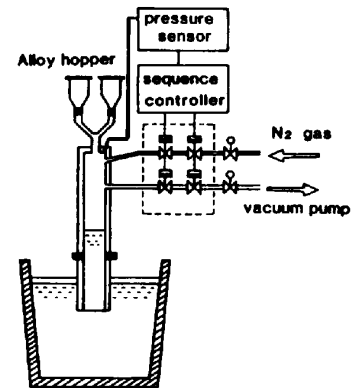


Fig. 11 Schematic view of PM Process

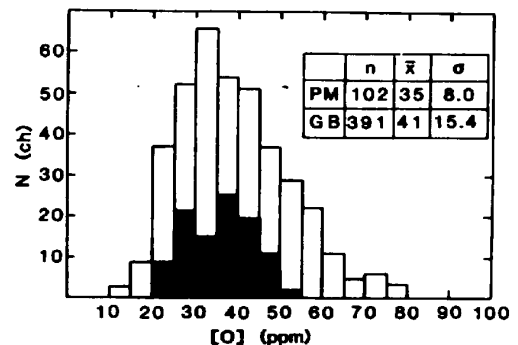


Fig. 12 Comparison of oxygen content of Al killed steel between PM process and gas bubbling (GB)